

УДК 621.382  
EDN: TAZXVS

PASC: 85.60.-q

## Шумовой диод как основа для создания сигнализатора температуры

А. О. Зеневич, О. В. Кочергина

*Исследована возможность использования шумовых диодов для измерения температуры, а также применения этих диодов в качестве основы для создания сигнализаторов температуры. В качестве объектов исследования были выбраны кремниевые шумовые диоды производства ОАО «ЦВЕТПРОН» (Республика Беларусь) моделей ND102L, ND103L, ND104L. Получено, что зависимости электрического тока шумового диода  $I$  от температуры  $T$  при постоянном напряжении обратного смещения, превышающем напряжение пробоя  $p$ - $n$ -перехода шумового диода имеют линейный участок. Величина этого линейного участка зависит от величины превышения напряжением обратного смещения напряжения пробоя  $p$ - $n$ -перехода шумового диода. Показано, что при напряжениях обратного смещения, превышающих напряжения пробоя  $p$ - $n$ -перехода для температуры 318 К протяженность линейного участка зависимостей  $I$  от  $T$  соответствовала всему исследуемому диапазону температур. Это может быть положено в основу работы сигнализатора температуры на основе шумового диода.*

*Ключевые слова:* шумовой диод, температура,  $p$ - $n$ -переход, пробой, сигнализатор.

DOI: 10.51368/1996-0948-2024-5-73-78

### Введение

В шумовых диодах, используемых для создания генераторов шума [1–4], ряд их характеристик имеет зависимость от температуры. К одной из таких характеристик можно отнести напряжение пробоя  $p$ - $n$ -перехода шумового диода [5–7].

Зависимость напряжения пробоя шумовых диодов от температуры приводит к тому, что при одном и том же напряжении обратного смещения шумового диода, но разных темпе-

ратурах через диод протекают различные по величине электрические токи.

В настоящее время отсутствуют исследования, на основании которых можно сделать вывод о возможности использования шумовых диодов для измерения температуры и в устройствах подачи предупреждающего электрического сигнала о том, что температура достигла некоторого заданного значения. Такие устройства далее будут называться сигнализаторами температуры.

Поэтому целью данной статьи являлось установить возможность использования шумовых диодов для измерения температуры, а также применения этих диодов в качестве основы для создания сигнализаторов температуры.

### Экспериментальная установка и методика измерений

Исследования выполнены на экспериментальной установке, структурная схема которой представлена на рисунке 1.

---

**Зеневич Андрей Олегович**, ректор, профессор, д.т.н.  
**Кочергина Ольга Викторовна**, доцент кафедры, к.т.н.  
E-mail: o.kochergina@bsac.by  
УО «Белорусская государственная академия связи».  
Республика Беларусь, 220114, г. Минск,  
ул. Ф. Скорины, 8/2.

Статья поступила в редакцию 9.07.2024

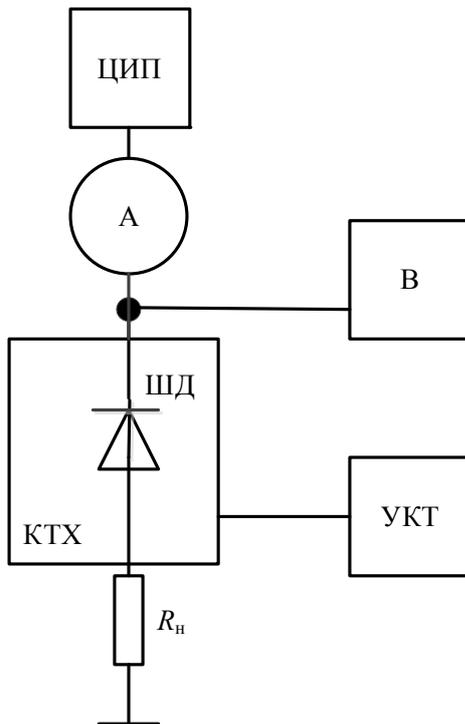
После доработки 5.08.2024

Принята к публикации 12.08.2024

Шифр научной специальности: 2.2.2

---

© Зеневич А. О., Кочергина О. В., 2024



**Рис. 1.** Структурная схема экспериментальной установки: ЦИП – цифровой источник питания; А – амперметр; ШД – шумовой диод; В – вольтметр; КТХ – камера тепла и холода; УКТ – устройство контроля температуры;  $R_n$  – нагрузочный резистор

Для обеспечения наличия постоянного входного напряжения шумового диода ШД использовался цифровой источник питания ЦИП, позволяющий устанавливать напряжение питания с точностью до сотых вольт. Напряжение обратного смещения  $U_{см}$  шумового диода выбиралось близким или превышающим напряжение лавинного пробоя  $U_{пр}$  его  $p-n$ -перехода, так как при таких напряжениях происходит лавинный пробой шумового диода. Для ограничения тока, протекающего через шумовой диод, использовалось сопротивление нагрузки равное  $R_n = 1$  кОм. Такая величина сопротивления  $R_n$  позволяла обеспечивать значения электрических токов шумового диода для всех используемых  $U_{см}$  меньшей величины тока, при которой происходил тепловой пробой шумового диода.

Напряжение обратного смещения, приложенное к шумовому диоду, измерялось при помощи вольтметра В. Величина электрического тока, протекающего через шумовой диод, определялась амперметром А.

Температура шумового диода изменялась камерой тепла и холода КТХ в диапазоне

от 228 до 318 К. Такой температурный диапазон обусловлен климатическими условиями эксплуатации исследуемых шумовых диодов.

Измерения температуры в камере тепла и холода КТХ осуществлялось устройством контроля температуры УКТ.

В процессе проведения исследований определялось напряжения пробоя  $p-n$ -перехода шумовых диодов  $U_{пр}$  при помощи методики, описанной в работе [8], на основании вольт-амперной характеристики.

Также при проведении исследований определялась величина последовательного сопротивления шумового диода  $R$  для линейного участка обратной ветви вольт-амперной характеристики по следующей формуле:

$$R = \frac{U_{см}}{I} \quad (1)$$

где  $I$  – электрический ток, протекающий через шумовой диод.

В качестве объектов исследования были выбраны кремниевые шумовые диоды производства ОАО «ЦВЕТОТРОН» (Республика Беларусь) моделей  $ND102L$ ,  $ND103L$ ,  $ND104L$ . Шумовые диоды этого производителя уже достаточно хорошо зарекомендовали себя при использовании в генераторах шума [9–11].

При исследовании шумовых диодов использовался параметр  $\Delta U$ , определяемый как:

$$\Delta U = U_{см} - U_{1пр}, \quad (2)$$

где  $U_{1пр}$  – напряжением пробоя  $p-n$ -перехода шумового диода при  $T = 318$  К.

## Результаты измерения и их обсуждение

Проведенные исследования зависимости напряжения пробоя  $p-n$ -перехода шумовых диодов  $U_{пр}$  показали, что с увеличением температуры напряжение пробоя исследуемых шумовых диодов линейно увеличивается. Это связано с тем, что повышение температуры приводит к увеличению вероятности рассеяния свободных носителей заряда на колебаниях кристаллической решетки шумового диода. В результате этого повышается вероятность того, что на длине свободного пробега в области лавинного умножения  $p-n$ -перехода носитель заряда приобретает энергию, необ-

ходимую для возникновения лавинного пробоя этого диода [8], что приводит к понижению величины  $U_{пр}$ .

Характеризовать линейную зависимость  $U_{пр}(T)$  можно используя отношение  $\Delta U_{пр}/\Delta T$ , где  $\Delta U_{пр}$  – изменение напряжения пробоя, при изменении температуры  $\Delta T$ . Значения  $\Delta U_{пр}/\Delta T$  для исследуемых шумовых диодов представлены в таблице. Наибольшие значения напряжения пробоя характерны для  $ND102L$ , а наименьшие для  $ND104L$  во всем диапазоне исследуемых температур. Наиболее сильно зависимость напряжения пробоя от температуры проявляется для  $ND103L$ , а наименее для  $ND102L$ . Это связано с различием внутренней структуры этих шумовых диодов.

Увеличение температуры приводит к снижению последовательного сопротивления  $R$  (см. таблицу). Зависимость  $R$  от температуры  $T$  имеет линейный характер для всех исследуемых шумовых диодов. Коэффициент линейности зависимости  $R(T)$  определялся как  $\Delta R/\Delta T$  где  $\Delta R$  – изменение последовательного сопротивления при изменении температуры  $\Delta T$ . Значения величины  $\Delta R/\Delta T$  представлены в таблице. Как следует из данных, представленных в таблице, зависимость  $R(T)$  наиболее сильно проявляется для  $ND102L$  и наименее – для  $ND104L$ . Это также связано с различием внутренней структуры этих шумовых диодов.

Отметим, что уменьшение температуры от 318 К до 228 К приводило к увеличению последовательного сопротивления. Увеличение сопротивления связано с тем, что понижение температуры приводило к уменьшению числа свободных носителей заряда в полупроводниковой структуре шумового диода [12, 13].

Понижение температуры при постоянном значении напряжения обратного смещения влекло увеличение электрического тока  $I$ , протекающего через шумовой диод. В данном случае речь идет о напряжениях обратного смещения, превышающих напряжения пробоя  $p$ – $n$ -перехода шумового диода. Такой рост величины  $I$  связан с тем, что с уменьшением температуры понижается значение  $U_{пр}$ . При постоянном значении напряжения обратного смещения понижение напряжения пробоя  $p$ – $n$ -перехода шумового диода приводило к увеличению разности между  $U_{см}$  и  $U_{пр}$ . Именно эта разность вносит определяющий вклад в значение электрического тока, протекающего через шумовой диод [14, 15]. Увеличение последовательного сопротивления шумового диода с понижением температуры на 17,5; 15,0 и 3,2 % для  $ND102L$ ,  $ND103L$  и  $ND104L$  соответственно, как это было отмечено выше, не позволяет компенсировать увеличение  $I$  за счет роста разности между  $U_{см}$  и  $U_{пр}$ .

Таблица

Характеристики шумовых диодов при различных температурах

Тип шумового диода	$T$ , К	$U_{пр}$ , В	$R$ , кОм	$\Delta R/\Delta T$ , кОм/К	$\Delta U_{пр}/\Delta T$ , мВ/К
$ND102L$	228	9,03	1200	– 2,3	2,6
	318	9,27	990		
$ND103L$	228	8,47	1070	– 1,8	3,3
	318	8,79	910		
$ND104L$	228	7,50	2860	– 1,0	3,0
	318	7,80	2770		

На рисунке 2 представлены зависимости тока шумового диода от температуры при постоянном напряжении обратного смещения на примере  $ND103L$ . Представленные зависимости являются типовыми. Для всех исследуемых шумовых диодов данные зависимости имели аналогичный вид. Как видно из полученных зависимостей, каждая из них имеет линейный участок, протяженность которого

увеличивается с ростом  $U_{см}$ . Линейная зависимость электрического тока, протекающего через шумовой диод, от температуры наблюдалась только для тех значений  $T$ , для которых  $U_{см} > U_{пр}$ .

Отметим, что протяженность участка температур  $\Delta T$ , на котором наблюдалась линейная зависимость  $I$  от  $T$ , была тем меньше, чем меньше величина  $\Delta U$ .

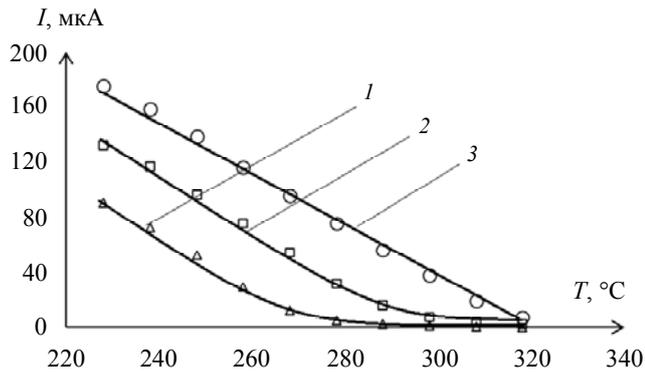


Рис. 2. Типовая зависимость тока от температуры при постоянном напряжении обратного смещения: 1 – при 8,70 В; 2 – при 8,80 В; 3 – при 8,91 В

Зависимости  $\Delta T$  от величины  $\Delta U$  для исследуемых шумовых диодов, представлены на рисунке 3. Отметим, что величина  $\Delta T = T_2 - T_1$ , где  $T_1 = 228$  К,  $T_2$  – температура большая  $T_1$ , при которой еще сохраняется линейная зависимость между  $I$  от  $T$ . Температура  $T_2$  определялась 10%-му отклонению величины электрического тока шумового диода от линейной зависимости  $I$  от  $T$ .

Как следует из рисунка 3, при увеличении значения  $\Delta U$  растет участок температур  $\Delta T$ , в которых зависимость  $I(T)$  линейна. При  $\Delta U \geq 0,20$  В для  $ND102L$ , при  $\Delta U \geq 0,12$  В для  $ND103L$  и  $U \geq 0,05$  В для  $ND104L$  протяженность линейного участка зависимостей  $I$  от  $T$  соответствовала всему исследуемому диапазону температур. Именно такие величины  $\Delta U$  необходимо выбирать для определения температуры при помощи шумовых диодов для температурного диапазона от 318 до 228 К.

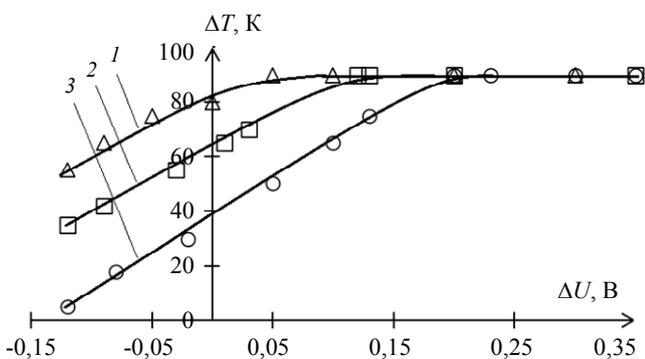


Рис. 3. Зависимость  $\Delta T$  от величины  $\Delta U$ : 1 – для  $ND104L$ ; 2 – для  $ND103L$ ; 3 – для  $ND102L$

Отметим, что при выборе величины  $\Delta U$  необходимо обращать внимание на величину

электрического тока  $I$ , протекающего через шумовой диод. Величина  $I$  должна не превышать 200 мкА, в противном случае может наступить тепловой пробой шумового диода.

На основании проведенных исследований можно предложить способ определения достижения материальным объектом заданного значения температуры при помощи шумового диода. Этот способ заключается в следующем:

- получают калибровочную зависимость между электрическим током  $I$ , протекающим через шумовой диод, и температурой  $T$  при напряжении обратного смещения со значением  $U_{\text{см}}$ , превышающим напряжение пробоя  $p$ - $n$ -перехода шумового диода на такую величину, при котором зависимость  $I$  от  $T$  линейна в области достигаемой температуры;
- устанавливают шумовой диод на материальный объект температуру которого необходимо контролировать;
- подают на шумовой диод постоянное значение напряжения обратного смещения  $U_{\text{см}}$ ;
- определяют значение электрического тока  $I_{\text{д}}$ , соответствующее достигаемой температуре  $T_{\text{д}}$  по калибровочной зависимости;
- контролируют величину электрического тока  $I$ , протекающий через шумовой диод;
- формируют сигнал о том, что температура материальным объектом достигла заданного значения при  $I = I_{\text{д}}$ .

Этот способ может быть положен в основу работы сигнализатора температуры на основе шумового диода.

## Заключение

Получено, что зависимости электрического тока шумового диода от температуры при постоянном напряжении обратного смещения, превышающем напряжение пробоя  $p$ - $n$ -перехода шумового диода имеют линейный участок. Величина этого линейного участка зависит от величины превышения напряжением обратного смещения напряжением пробоя  $p$ - $n$ -перехода шумового диода.

Показано, что наличие линейной зависимости между электрическим током шумового диода и температурой делает возможным использование данных диодов для измерения температуры.

Предложен способ определения достижения материальным объектом заданного значения температуры при помощи шумового диода. Этот способ может быть положен в основу работы сигнализатора температуры на основе шумового диода.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Franco Rota. / VHF Communications. 2007. № 1. P. 11–18.
2. Franco Rota. / VHF Communications. 2008. № 4. P. 241–248.
3. Pralgauskaitė Sandra, Palenskis Vilius, Matukas Jonas. White noise peculiarities in diode structures // Conference Paper. 2013. P. 1–5.
4. Klyuev A. V., Shmelev E. I., Yakimov A. V. / Fluct. Noise Lett. 2012. Vol. 11. № 2.
5. Винокуров С. А., Кочемасов В. Н., Сафин А. Р. / Известия вузов России. Радиоэлектроника. 2023. Т. 26. № 4. С. 6–32.
6. Рентюк В. / Компоненты и технологии. 2014. № 1. С. 136–137.
7. Бельский А. Я., Сацук С. М., Путилин В. Н. / Доклады БГУИР. 2020. № 18 (5). С. 9–16.
8. Гулаков И. Р., Зеневич А. О. Фотоприемники квантовых систем: монография. – Минск: УО ВГКС, 2012.
9. Buslyuk V. V., Odzhayev V. B., Panfilenko A. K., Petlitsky A. N., Prosolovich V. S., Filipyeyna V. A., Yankovsky Yu. N. / Russian Microelectronics. 2020. Vol. 49. № 4. P. 295–301.
10. Горбадей О. Ю., Зеневич А. О. / ПФМТ. 2018. № 2. С. 7–10.
11. Буслюк В. В., Нерода И. Ю., Петлицкий А. Н., Просолович В. С., Янковский Ю. Н., Лановский Р. А. / Журнал Белорус. гос. ун-та. Физика. 2017. № 1. С. 95–99.
12. Лебедев А. И. Физика полупроводниковых приборов. – М.: Физмалит, 2008.
13. Зу С. Физика полупроводниковых приборов. – М.: Мир, 1989.
14. Барановский О. К., Горбадей О. Ю., Зеневич А. О., Сильченко О. М. / Проблемы инфокоммуникаций. 2017. № 1 (5). С. 13–18.
15. Горбадей О. Ю., Зеневич А. О. / Телекомунікаційні та інформаційні технології. 2017. № 3 (56). С. 12–17.

PASC: 85.60.-q

## Noise diode as a basis for creation temperature alarm

*A. O. Zenevich and O. V. Kochergina*

Belarusian State Academy of Communications  
8/2 F. Skorina st., Minsk, 220114, Belarus

*Received 9.07.2024; revised 5.08.2024; accepted 12.08.2024*

***Currently, noise diodes are widely used to create noise generators. The breakdown voltage of the p–n junction of noise diodes depends on temperature. However, at present there are no studies on the basis of which it can be concluded that such a dependence can be used to measure temperature. Therefore, the purpose of this article was to establish the possibility of using noise diodes to measure temperature, as well as the use of these diodes as the basis for creating temperature alarms. Silicon noise diodes produced by TsVETOTRON JSC (Republic of Belarus) models ND102L, ND103L, ND104L were chosen as objects of study. It was found that the dependence of the noise diode's electric current on temperature at a constant reverse bias voltage exceeding the breakdown voltage of the p–n junction of the noise diode has a linear section. The magnitude of this linear section depends on the magnitude of the reverse bias voltage exceeding the breakdown voltage of the p–n junction of the noise diode. It was shown that at reverse bias voltages exceeding the breakdown voltage of the p–n junction for a temperature of 318 K, the length of the linear portion of the dependences of  $I$  on  $T$  corresponded to the entire temperature range under study. This method can be used as the basis for the operation of a temperature alarm based on a noise diode.***

**Keywords:** noise diode, temperature, p–n junction, breakdown, alarm.

**REFERENCES**

1. Franco Rota, VHF Communications, № 1, 11–18 (2007).
2. Franco Rota, VHF Communications, № 4, 241–248 (2008).
3. Sandra Pralgauskaitė, Vilius Palenskis and Jonas Matukas, Conference Paper, 1–5 (2013).
4. Klyuev A. V., Shmelev E. I. and Yakimov A. V., Fluct. Noise Lett. **11** (2), (2012).
5. Vinokurov S. A., Kochemasov V. N. and Safin A. R., News of Russian universities. Radioelectronics **26** (4), 6–32 (2023) [in Russian].
6. Rentyuk V., Components and Technologies, № 1, 136–137 (2014) [in Russian].
7. Belsky A. Ya., Satsuk S. M. and Putilin V. N., Reports of BSUIR, № 18 (5), 9–16 (2020) [in Russian].
8. Gulakov I. R. and Zenevich A. O., Photodetectors of quantum systems: monograph, Minsk, UO VGKS, 2012 [in Russian].
9. Buslyuk V. V., Odzhayev V. B., Panfilenko A. K., Petlitsky A. N., Prosolovich V. S., Filipyenia V. A. and Yankovsky Yu. N., Russian Microelectronics **49** (4), 295–301 (2020).
10. Gorbadei O. Yu. and Zenevich A. O., PFMT, № 2, 7–10 (2018) [in Russian].
11. Buslyuk V. V., Neroda I. Yu., Petlitsky A. N., Prosolovich V. S., Yankovsky Yu. N. and Lanovsky R. A., Journal Belarus. state un-ta. Physics, № 1, 95–99 (2017).
12. Lebedev A. I., Physics of semiconductor devices, Moscow, Fizmalit, 2008 [in Russian].
13. Zi S., Physics of semiconductor devices, Moscow, Mir, 1989 [in Russian].
14. Baranovsky O. K., Gorbadei O. Yu., Zenevich A. O. and Silchenko O. M., Problems of infocommunications, № 1 (5), 13–18 [in Russian].
15. Gorbadei O. Yu. and Zenevich A. O., Telecommunication and information technologies, № 3 (56), 12–17 (2017) [in Russian].